

# 東北大学へリアック装置における揺動計測を使った 閉じ込め改善モードの研究

著者	田中 豊
号	52
学位授与番号	3931
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37647">http://hdl.handle.net/10097/37647</a>

	たなか ゆたか
氏 名	田 中 豊
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成20年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
学 位 論 文 題 目	東北大学ヘリアック装置における揺動計測を使った閉じ込め改善モードの研究
指 導 教 員	東北大学准教授 北島 純男
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 笹尾眞實子 東北大学教授 橋爪秀利 東北大学教授 畠山力三 東北大学准教授 北島純男

## 論 文 内 容 要 旨

核融合プラズマ研究は1950年代に始まる。アメリカでは、プリンストン大学においてマッターホルン計画が開始され、L. Spitzer, Jr.によって、8の字型をした Figure 8 Stellarator や、トロイダルコイルとヘリカルコイルにより磁場配位を形成する C-Stellarator が提案された。旧ソ連でも、トカマクが発明され、イギリスでは、Harwell 原子力研究所で大型装置 ZETA で研究が進められていた。1958年の第2回原子力平和利用国際会議において、アメリカやイギリスの研究成果が公開され、日本を含めて世界各国で研究が行われるようになり、1960年頃には、京都大学の宇尾光治によってヘリカルコイルのみによるヘリオトロン/トルサトロン配位も提案された。旧ソ連で開発されたトカマクは1968年第3回プラズマ物理と制御熱核融合国際会議において登場し、閉じ込め時間が Bohm 時間の30倍と高い性能を示すことが発表された。その後トカマクの優位性が確認され、世界中で盛んにトカマクの研究が始められた。自己点火を目指す超高温プラズマを生成するために、中性粒子入射(NBI)加熱、電子サイクロトロン加熱(ECH)、イオンサイクロトロン加熱(ICH)などの加熱が必要である。加熱パワーに対する閉じ込め時間スケーリング則が評価され( $\tau_E \propto P^{0.5}$ )、加熱の増加に伴うエネルギー閉じ込め時間の悪化が確認された。この状態を L mode と呼ぶ。L mode プラズマは、核融合研究の目標に対立する現象であり、炉の巨大化を意味する。しかし、1982年 ASDEX トカマクにおいて、追加熱中にプラズマ閉じ込めが急激に改善する遷移現象が発見された。この状態を H mode と呼ぶ。その後の調べで H mode は、プラズマ表面近傍において密度温度が急勾配を持つことにより、プラズマ内部で高い密度温度を維持できる構造であることが判明した。現在ではトカマク、ステラレータの両装置において H mode や内部輸送障壁(ITB)等の閉じ込め改善現象が数々発見されている。将来の核融合炉では、これらの閉じ込め改善モードや H mode での運転が想定されている。

H mode の発見以来、実験・理論による両面からその物理研究が盛んに行われてきた。その例として、理論による LH 遷移モデルの提唱や、実験によるプラズマエッジにおける径電場の観測が挙げられる。人為的に H mode 遷移を試みる電極バイアス実験も行われ、 $H_\alpha$ 光低下や閉じ込め改善等が発生し、H mode と良く似た特

徴を持つことが確認された。これらの事実から、閉じ込め改善モードへの遷移には径電場が重要な役割を果たし、揺動に起因した異常輸送が径電場によって抑制されたことが閉じ込め改善の原因であると考えられている。一方で、閉じ込め改善モードでは、 $E \times B$  フロー、圧力・密度・温度勾配、揺動が共存する体系であるため、複雑な物理現象を示す。例えば、トカマクでは、間欠的なバーストを伴う ELMy H-mode が存在する。核融合炉において改善モードを利用するには、その制御が必要であり、揺動・異常輸送に起因した閉じ込め物理の理解が必要となる。これまで、東北大学では、立体磁気軸ステラレータである東北大学ヘリアック装置を用いて閉じ込め改善モードの研究を行ってきた。本装置では、熱陰極バイアスにより径電場形成、 $E \times B$  フロー形成、密度増加が確認され、電極を用いた閉じ込め改善プラズマの生成に成功してきた。一方で、プラズマ中心部において密度崩壊現象や間欠的な揺動のバーストも観測されている。この密度崩壊は、装置の閉じ込め時間よりも遥かに短い時間で、粒子を中心部から周辺部へ輸送する現象であり、核融合炉の実現に向けて理解すべき現象であると考えられる。本論文では、東北大学ヘリアック装置において観測されている密度崩壊現象の特性を理解することを目的とし、(1)~(3)の研究を行った。

#### (1)揺動計測用高速ラングミュアプローブの設計製作

熱陰極バイアスプラズマ中では、径電場( $E_r = 2 \sim 4 \text{ kV/m}$ )が形成され、径電場から  $E \times B$  ポロイダル回転周波数を見積もると、プラズマ中心部では 100 kHz 以上となる。揺動周波数は、分散式によって決定され、ドリフト波不安定性やフルート不安定性の場合には 10 kHz 程度となる。この周波数よりも高速な  $E \times B$  ポロイダル回転は、揺動周波数を 100 kHz 以上の帯域にシフトする。揺動計測には、 $E \times B$  ポロイダル回転周波数よりも 1 桁高い帯域 1 MHz が必要であり、高時間分解能を持つラングミュアプローブ法が有効である。ラングミュアプローブ法では、密度揺動と空間電位揺動の直接計測が困難であるが、それらが反映されるイオン飽和電流揺動と浮動電位揺動で代用可能である。そのため、揺動計測用のテストプローブを製作し、プローブチップ間距離と信号伝送方法を決定した。

- 揺動の波数見積もりには、2 点間での同時計測が必要であり、コヒーレントな距離にプローブを配置しなければならない。揺動のコヒーレンスの計算結果から、無バイアス時には相関長が 10 mm 以下であることが分かり、プローブ間距離を 10 mm 以下とする必要があることが判明した。
- 帯域 1 MHz、高 S/N での信号伝送には、浮動電位プローブの浮遊容量を 10 pF 程度まで抑制する必要がある。そのため、真空中にプリアンプを内蔵した揺動計測法を確立した。

これらの結果を反映させ、揺動計測とトリプルプローブ計測が同時に可能な高速トリプルプローブ(HSTP)を製作した。

#### (2)密度崩壊現象と揺動

HSTP、レイクプローブ、マイクロ波干渉計を用いた同時計測により、プラズマ中心部において、密度崩壊

とバースト性の揺動が観測された(図1参照)。信号のFFT解析により、密度崩壊の周波数は10 kHz以下であり、揺動の周波数は100 kHz以上であることが判明した。密度崩壊の特性は、以下のようになる。

- プラズマ中心部( $R_{TP} < 96$  mm)では、イオン飽和電流の減少(30 ~ 40 %)と浮動電位の上昇(10 ~ 20 V)が、プラズマ周辺部( $R_{TP} = 100 \sim 110$  mm)では、イオン飽和電流の増加(10 %程度)と浮動電位の上昇(5 ~ 10 V)が確認された(図2参照)。周辺部におけるイオン飽和電流の増加量と、中心部における減少量が比較され、両者が同程度であることが判明した。この事実は、密度崩壊に伴う中心部の粒子流出が、周辺部の粒子増加を引き起こしていることを示している。
- 密度崩壊前には、プラズマ中心部( $R_{TP} = 84 \sim 90$  mm)において急峻なイオン飽和電流勾配が存在し、密度崩壊後には、この勾配が消滅していた。これは、急峻な密度勾配と密度崩壊が、密接に関係していることを示唆している。
- 密度崩壊時には、径方向の浮動電位勾配が同時に減少しており、 $E \times B$  ポロイダル回転の低下を示している。浮動電位勾配の減少時に、揺動がバーストし、密度が減少していた。浮動電位勾配の上昇時には、揺動が消滅し、密度が上昇していた。相互相関関数の計算により、密度減少よりも約  $20 \mu s$  早くポロイダル回転が低下し始めることも判明した。

これらの結果を総合すると、揺動が密度崩壊の異常輸送を担っており、密度勾配が揺動の成長の原因であると考えられる。さらに、密度崩壊にはフローの低下も伴っており、フロー低下による揺動の抑制不良と、その結果発生した揺動による粒子輸送という構図であることが判明した。

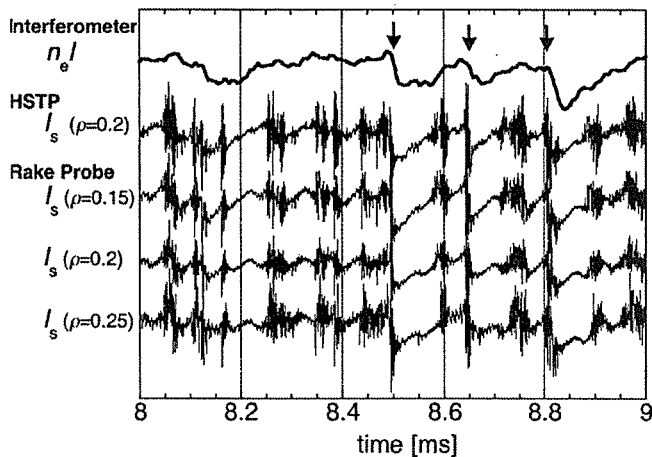


図1 干渉計、HSTP、レイクプローブによる同時計測  
矢印の時刻において、密度崩壊が発生している。イオン飽和電流には、間欠性の揺動も確認できる。

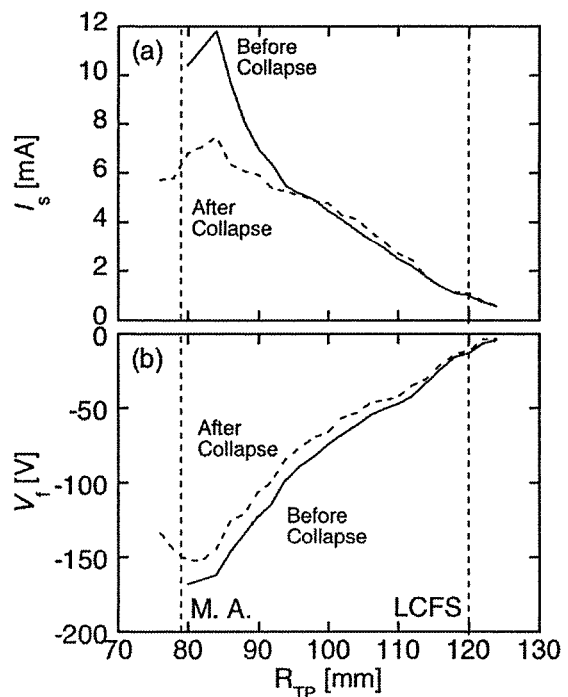


図2 密度崩壊前後のイオン飽和電流と  
浮動電位の径方向分布

### (3)揺動の特性理解

揺動は、異常輸送という形で、密接に関わっているため、本論文では、以下の2点に重点を置いて、揺動の特性を調べた。

#### (3-1) ポロイダル回転の影響

揺動の特性は、分散式で表され、分散式で揺動の周波数が決まる。例えば、ドリフト波不安定性やフルート不安定性の場合、周波数は約10 kHzとなる。一方で、 $E \times B$  ポロイダル回転は100 kHzを超えるため、ポロイダル回転が揺動の周波数を決定する可能性がある。そのため、揺動とポロイダル回転の周波数の比較を行った。図3は、揺動のパワースペクトルと、ポロイダル回転数の  $m = 1 \sim 4$  倍した値である。揺動周波数は、ポロイダル回転数の2~3倍程度であり、磁気軸に近づくにつれて周波数が上昇することが判明した。この結果は、ポロイダル回転が、揺動の周波数を決定していることを示している。また、揺動は  $m = 2$  or  $3$  のポロイダルモード数を持っていることから、特定のモードのみが成長・減衰を繰り返し、密度崩壊時の粒子輸送を引き起こしていることが判明した。

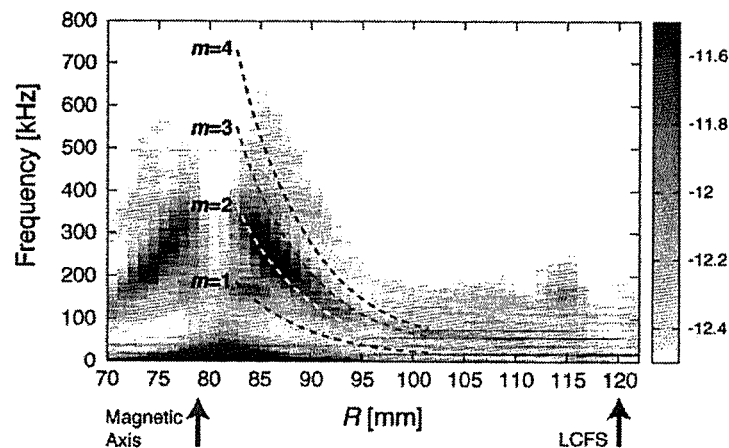


図3 揺動とポロイダル回転の周波数の比較  
ポロイダル回転は、 $m = 1 \sim 4$  倍してプロットしている。

#### (3-2) 配位依存性

揺動の種類によっては、磁力線方向の波数  $k_{\parallel}$  への依存度が高く、回転変換を変えることで揺動を制御できる可能性がある。そのため、回転変換の異なる配位において揺動を計測した。その結果、配位に依存して、揺動のパワーが変化することが確認できた。配位の変化と同時に、プラズマパラメータも変化しており、回転変換依存性かプラズマパラメータ依存性かを判断するために、揺動とプラズマパラメータとの比較を行った。その結果、イオン飽和電流の径方向の勾配と、揺動のパワーに、正の相関があることが判明した。イオン飽和電流の勾配は、密度勾配を表しており、揺動の不安定化の原因は密度勾配であると判断できる。配位ごとのパワー変化は、回転変換に依存したものではなく、選択した配位における回転変換の範囲では、その制御は困難である。

# 論文審査結果の要旨

核融合炉は、閉じ込め改善モードや H-mode での運転が想定されている。改善モードは、フロー、勾配、揺動が共存する体系であるため、複雑な物理現象を示す。例えば、トカマクでは、間欠的なバーストを伴う ELMy H-mode が存在する。改善モードの制御には、揺動・異常輸送に起因した閉じ込め物理の理解が必要となる。東北大学ヘリアック装置では、熱陰極バイアスにより閉じ込め改善プラズマの生成に成功し、同時にプラズマ中心部において密度崩壊現象が観測されている。この密度崩壊は、短時間で粒子を周辺部へ輸送する現象であり、核融合炉の実現に向けて理解すべき現象である。本研究では、密度崩壊時の密度の径方向分布が計測され、急峻な密度勾配領域において崩壊が発生することを明らかにした。崩壊の時間変化から、密度崩壊フェーズと密度上昇フェーズに分類可能であることが判明し、密度崩壊フェーズには、径電場低下・揺動のバースト・密度減少、密度上昇フェーズには、径電場上昇・揺動の消滅・密度上昇が発生していた。この事実は、密度勾配を駆動力に揺動が成長し、それによって引き起こされた異常輸送が崩壊の原因であることを示していた。バースト性の揺動は、異常輸送という形で崩壊現象と密接に関係しているため、揺動の特性を調べる必要がある。そのため、揺動計測用の高速なラングミュアプローブを製作し、帯域 1 MHz での静電揺動の計測が可能になった。このプローブを用いて、揺動周波数に対するポロイダル回転の影響が調べられ、高速回転プラズマでは、揺動周波数はポロイダル回転数で決定されることが明らかになった。揺動の密度勾配依存性と回転変換依存性が調べられ、回転変換を変えても、密度勾配へ高い依存性を持つことが明らかになった。これは、密度崩壊が、急峻な密度勾配領域に発生するという特徴と同じである。本研究では、径電場による揺動抑制不良、密度勾配を駆動力にした揺動の成長、異常輸送の発生が崩壊の原因であることを明らかにした。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編 8 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、東北大学ヘリアック装置について詳細に理解し、本研究を実行するために必要な実験設備について述べている。これは、本研究で精密な計測をするために必要な知見である。

第 3 章では、熱陰極バイアス実験における閉じ込め改善プラズマの基礎特性を明らかにしている。これは、有効かつ非常に重要な成果である。

第 4 章では、高速型ラングミュアプローブの開発を述べている。改善モードにおける高速回転プラズマの計測には高帯域な計測装置が必要不可欠であり、改善モードにおける揺動計測、揺動理解のために重要な成果である。

第 5 章では、閉じ込め改善モードにおける密度崩壊現象と高周波揺動について述べている。密度崩壊のメカニズムが示されており、有効かつ非常に重要な知見である。

第 6 章では、揺動周波数に対するポロイダル回転数依存性を調べており、高速回転プラズマでは、揺動周波数がポロイダル回転数で決定されることを明らかにした。これは、揺動の理解に対して非常に重要な知見である。

第 7 章では、高周波揺動の、密度勾配依存性、回転変換依存性を明らかにしており、密度崩壊の特性理解ために重要な成果である。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、閉じ込め改善モードにおける密度崩壊現象の特性を、揺動計測を使用し、明らかにしたものであり、量子エネルギー工学および核融合プラズマ物理の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。